

УДК 669.01

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТВЕРДОСТИ ЛЕНТЫ ИЗ СТАЛИ 60С2А ОТ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*Е.М. Фомичева*

ОАО «Гидроавтоматика»  
Россия, 443052, г. Самара, Заводское шоссе, 53

*Основное внимание уделено исследованию влияния режимов термической обработки на механические свойства и микроструктуру деталей из стальной ленты 60С2А толщиной 0,3 мм с целью установления их соответствия требованиям производственной инструкции по термической обработке. Проанализированы значения твердости по Виккерсу, установлено их несоответствие требуемым значениям. Методами металлографического анализа изучена микроструктура сплава детали. Исследована зависимость между микроструктурой и значениями твердости. Описаны режимы термической обработки материала деталей и дефекты, вызванные несоблюдением технологического процесса. Даны рекомендации по предотвращению несоответствия значений твердости требованиям нормативных документов.*

**Ключевые слова:** *конструкционная рессорно-пружинная сталь 60С2А, закалка, отпуск, микроструктура, мартенсит, троостит, твердость по Виккерсу.*

### Введение

В процессе эксплуатации гидравлической системы самолета возможны следующие неисправности: внешняя негерметичность агрегатов и трубопроводов из-за потери эластичности и усадки материала уплотнительных колец, неточного изготовления уплотнений и поверхностей под уплотнения; внутренняя негерметичность агрегатов по причине износа уплотнителей [1].

Наиболее распространенный материал для изготовления уплотнительных колец гидравлической системы самолета – лента из конструкционной рессорно-пружинной стали 60С2А.

Данная марка относится к высококачественным легированным сталям. Марке 60С2А свойственны отличные способности к сопротивлению знакопеременным и ударным нагрузкам, хорошие пружинящие способности, повышенная склонность к обезуглероживанию; при нагреве этой стали не происходит увеличения зерна материала [2, 3].

После штамповочной операции детали подвергаются термической обработке: закалка ( $850^{\pm 10}$  °С с выдержкой 6 мин и охлаждением в масле) + отпуск ( $430^{\pm 10}$  °С с выдержкой 40 мин и охлаждением в воде).

Марка 60С2А распространена в производстве не только в России, но и в зарубежных странах. В табл. 1 представлены точные и ближайшие зарубежные аналоги материала 60С2А.

В настоящее время процесс в зарубежной литературе большое внимание уделяется деформационным режимам изготовления ленты (прокатка) [4, 5]. Процесс термической обработки стали марки 60С2А практически

---

*Екатерина Михайловна Фомичева, начальник металлографической и механической лаборатории.*

не рассматривается, так как большее внимание и распространение получила марка стали 60Si2MnA, по химическому составу практически схожая с маркой стали 60C2A, но отличающаяся химическим составом: повышенным содержанием марганца и присутствием ванадия.

Таблица 1

**Зарубежные аналоги материала 60C2A**

США	Германия	Япония	Франция	Англия	Китай	Болгария
–	DIN, WNr	JIS	AFNOR	BS	GB	BDS
9260 G92600	60MnSiCr4 60SiCr7 65Si7	SUP6 SUP7	61SiCr7	251H60	60Si2Mn	60S2A

В табл. 2 указан химический состав пружинной стали марки 60Si2MnA.

Таблица 2

**Химический состав стали марки 60Si2MnA**

Элемент	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	V
Массовая доля элемента, %	0,52–0,6	1,5–2	1–1,3	до 0,35	до 0,35	до 0,25	0,08–0,16

В зарубежной литературе рассматривается влияние режимов прокатки, штамповки и дисперсности перлитного зерна в исходной микроструктуре на механические свойства готовой продукции [6, 7, 8].

На производстве при изготовлении деталей возникает вопрос появления их пониженной твердости. Для решения вопроса улучшения механических характеристик необходимо изучить влияние термической обработки данного сплава на твердость по Виккерсу и микроструктуру.

Целью данного исследования является изучение процесса термической обработки деталей из данного сплава для получения требуемой микроструктуры и механических свойств, соответствующих нормативно-технической документации.

**Материалы и методики**

Химический состав данной марки стали по ГОСТ 14959-79 указан в табл. 3.

Таблица 3

**Массовая доля элементов в стали марки 60C2A по ГОСТ 14959-79 – прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали**

Элемент	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu
Массовая доля элемента, %	0,58–0,63	1,6–2	0,6–0,9	до 0,25	до 0,35	до 0,35

После поступления закупленной ленты из стали марки 60C2A на склад производится входной контроль. В процедуру входного контроля входит спектраль-

ный анализ на спектрометре МФС-8. После подтверждения соответствия химического состава нормативно-технической документации ленты отправляют на изготовление деталей – колец уплотнителей с последующей термической обработкой в виде закалки и отпуска. Из одной и той же ленты делаются различные партии деталей с разрывом по времени. Процесс закалки деталей и образцов-свидетелей проводится при температуре  $850^{+10}$  °С, отпуск – при температуре  $430^{+10}$  °С.

По окончании цикла термической обработки образцы-свидетели в количестве 10 штук отправляются на контроль твердости по Виккерсу и исследование микроструктуры. Для изготовления образцов вырезается часть уплотнителя и шлифуется с обеих сторон с соблюдением параллельности поверхностей. Проводится испытание на твердость, после чего образец травится в 5%-м растворе азотной кислоты в воде и исследуется микроструктура с помощью анализатора фрагментов микроструктуры твердых тел Siams 700.

### Результаты

Спектральный анализ показал соответствие химического состава ленты требованиям ГОСТ 14959-79. Химический состав исследованного образца указан в табл. 4.

Таблица 4

**Массовая доля элементов в образце из стали марки 60С2А**

Элемент	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu
Массовая доля элемента, %	0,612	1,8	0,734	0,115	0,223	0,146

Начальные данные по параметрам и режимам технологии производства деталей из ленты стали марки 60С2А взяты из технологического процесса предприятия изготовителя.

В ходе исследования для выявления связи твердости и микроструктуры взято 6 проб по двум термическим садкам. Значения твердости по Виккерсу после термической обработки указаны в табл. 5.

Таблица 5

**Твердость по Виккерсу**

№ термической садки (т/с)	№ образца	Значение твердости по Виккерсу, HV
1	238	336
	239	349
	243	509
2	244	309
	260	238
	264	286

На рис. 1 показана микроструктура исходного материала до проведения термической обработки. В микроструктуре наблюдается эвтектоид – перлит, состоящий феррита и цементита.

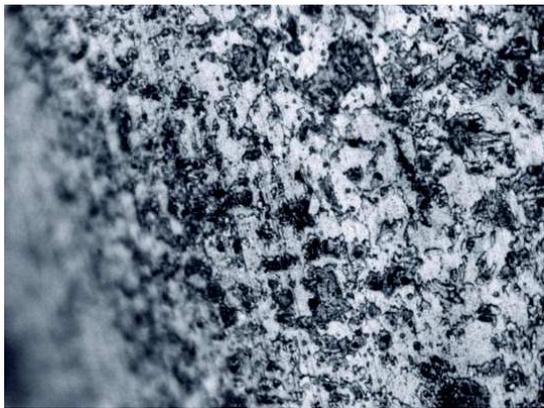


Рис. 1. Микроструктура исходного материала – феррит + перлит, увеличение X1000

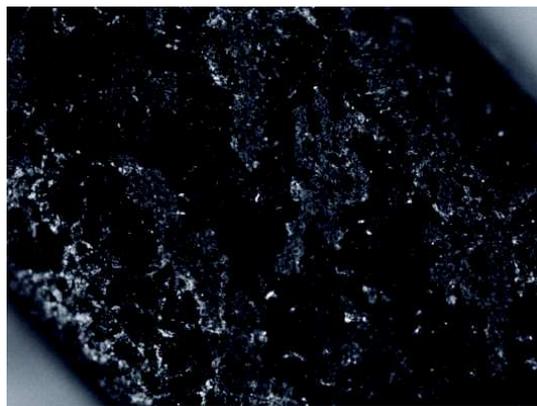


Рис. 2. Микроструктура образца № 49 – игольчатый мартенсит, остаточный аустенит, увеличение X1000

На рис. 2 показана микроструктура образца № 49. Данный образец взят из предыдущей партии уплотнительных колец и имеет микроструктуру, которая соответствует указанным режимам термической обработки, – игольчатый мартенсит, остаточный аустенит, карбидные выделения в ферритной матрице.

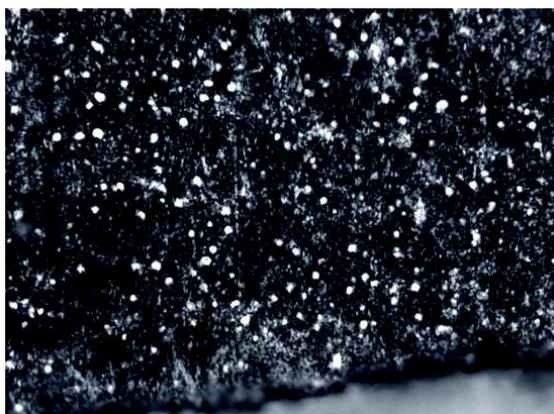


Рис. 3. Микроструктура образца № 238 т/с 1 (отпущенный мартенсит – остаточный аустенит), увеличение X1000



Рис. 4. Микроструктура образца № 244 т/с 2 (мартенсит отпуска, феррит), увеличение X1000

На рис. 3, 4 показаны микроструктуры образцов № 238, 244: отпущенный мартенсит и частицы карбидов на образце № 238 и мартенсит отпуска с прожилками цементита на образце № 244.

На рис. 5, 6 показана микроструктура образца № 243 – троостит отпуска с обезуглероженным слоем.

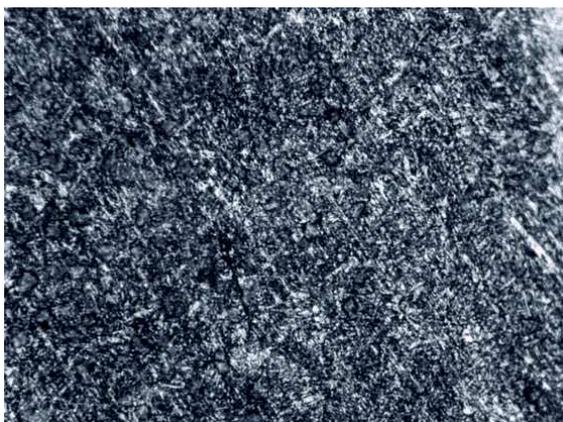


Рис. 5. Микроструктура образца № 243 (троостит отпуска), увеличение X1000



Рис. 6. Микроструктура образца № 243 с обезуглероженным слоем (троостит отпуска), увеличение X1000

### Обсуждение результатов

По требованиям технологического процесса твердость уплотнительных колец должна находиться в диапазоне 440–510 HV, но из табл. 5 видно, что у исследованных образцов твердость не соответствует требуемым значениям. Причины несоответствия можно выяснить путем анализа микроструктуры.

Для обеспечения оптимальных механических свойств сталь 60С2А должна иметь однородную структуру, для данных температур термической обработки годная микроструктура соответствует мартенситу отпуска по всему сечению детали [9].

В ходе исследования сделан микрошлиф исходного образца до термической обработки. Следует учесть, что, согласно данным выписки из сертификата на ленту марки материала 60С2А, с деталями ранних партий из данной ленты никаких несоответствий при проведении производственного цикла изготовления деталей не возникало.

Пружинно-рессорная сталь марки 60С2А относится к перлитному классу сталей, соответственно исходная равновесная структура – феррит+перлит (см. рис. 1).

В процессе отпуска микроструктура стали 60С2А претерпевает три стадии превращений.

Первая стадия протекает в диапазоне температур 80–200 °С – формируется структура отпущенного мартенсита [10], данную структуру наблюдаем на образце № 238 т/с 1, где твердость по Виккерсу составляет 336 единиц, что не соответствует заложенным требованиям технологического процесса термической обработки завода изготовителя (см. рис. 3).

Второе превращение при отпуске развивается в интервале температур 200–300 °С и состоит из превращения остаточного аустенита в отпущенный мартенсит и распада отпущенного мартенсита [10] (данная структура наблюдается на образце № 244 т/с 2, где твердость по Виккерсу составляет 309 единиц, что также не соответствует требуемым значениям твердости) (см. рис. 4).

Третья стадия, или превращение, происходит при 300–450 °С. При этом заканчивается распад отпущенного мартенсита [10]. Структура стали после среднего отпуска (350–500 °С) – троостит отпуска (высокодисперсный перлит) с остаточным аустенитом. Данная структура наблюдается на образце № 243

с твердостью по Виккерсу 509 единиц, что соответствует требованиям технологического процесса (рис. 5). Но в данной окончательной структуре по краям образца наблюдается обезуглероженный слой (рис. 6), который сигнализирует об отступлениях от корректного технологического процесса и может повлиять на работоспособность детали из-за своих пониженных физико-механических свойств.

Для сравнения в исследовании изготовили поперечный микрошлиф образца № 49 от той же партии материала, где значение твердости по Виккерсу – 480 единиц, что соответствовало требованиям технологического процесса. В данной структуре наблюдаем несколько составляющих: игольчатый мартенсит отпуска, остаточный аустенит и феррит (см. рис. 2).

Отличие микроструктур годных образцов № 243 и протокола № 49 объясняется повышенной дисперсностью исходной структуры образца № 243. Чем выше дисперсность, тем больше центров зарождения аустенита, следовательно, возрастает дисперсность продуктов его распада. Этим же и объясняется, что твердость образца протокола № 243 выше твердости образца протокола № 49. Так как троостит отпуска мелкодисперсный, его твердость выше твердости более крупного мартенсита с остаточным аустенитом. Обе структуры появляются после среднего отпуска и обеспечивают заложенную технологией твердость (являются допустимыми структурами для данных режимов термической обработки и марки стали) [9].

Структуры образцов № 238 и 244 являются промежуточными структурами при режиме отпуска, полное превращение игольчатого мартенсита не произошло. Данные структуры не обеспечивают заложенные требования к твердости и не могут быть рекомендованы для стали 60С2А.

Возникшие дефекты микроструктуры и пониженное значение твердости являются результатом нарушения режимов технологического процесса термической обработки, сокращения времени выдержки во время отпуска.

Исходя из исследования можно сделать вывод, что в случае изготовления уплотнителя из ленты марки стали 60С2А желание сократить время производственного процесса приводит к браку готовой продукции.

### **Заключение**

Пониженное значение твердости детали вызвано нарушением режимов технологического процесса термической обработки. Данный вывод сделан после проведения ряда исследований образцов с анализом микроструктуры, который наглядно свидетельствует о нарушениях в проведении стадий термической обработки. Микроструктура с пониженной твердостью не соответствует требованиям к микроструктуре (троостит отпуска) закаленного и отпущенного сплава 60С2А.

С целью исключения подобных дефектов необходимо производить термическую обработку четко в соответствии с требованиями технологического процесса с регистрацией всех параметров и термических садок.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Системы самолета-истребителя типа МиГ-29: Учеб. пособие / В.И. Дубинский, Л.М. Кунбутаев, С.Я. Пелешанко и др.; Под ред. В.И. Дубинского. – М.: Изд-во МАИ, 1997. – 88 с.
2. Гуляев А.П. *Металловедение*. – М.: Альянс, 2012. – 644 с.
3. Термическая обработка в машиностроении: Справочник / Под. ред. Ю.М. Лахтина, А.Г. Рахштадта. – М.: Машиностроение, 1980. – 783 с.

4. *Renbo Song, Yonglin Kang, Aimin Zhao.* Semi-solid rolling process of steel strips Journal of Materials Processing Technology Volume 198, Issues 1–3, 3 March 2008, Pages 291–299.
5. *Yang Li, Yu-peng Lu, Chong Wang, Shi-tong Li, Lu-bin Chen.* Phase Stability of Residual Austenite in 60Si2Mn Steels Treated by Quenching and Partitioning Journal of Iron and Steel Research, International Volume 18, Issue 2, February 2011, Pages 70–74.
6. *Podgornik B., Leskovšek V., Godec M., Senčič B.* Microstructure refinement and its effect on properties of spring steel Materials Science and Engineering: A Volume 599, 2 April 2014, Pages 81–86.
7. *Chao-lei Zhang, Xiang Liu, Le-yu Zhou, Ya-zheng Liu.* Influence of Pearlite Interlamellar Spacing on Strain Hardening Behaviour in Spring Steel 60Si2MnA Procedia Engineering Volume 81, 2014, Pages 1283–1287. 11th International Conference on Technology of Plasticity ICTP 2014, 19–24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan.
8. *Chaolei Zhang, Leyu Zhou, Yazheng Liu.* Heredity in the Microstructure and Mechanical Properties of Hot-rolled Spring Steel Wire 60Si2MnA during Heat Treatment Process Journal of Materials Science & Technology Volume 29, Issue 1, January 2013, Pages 82–88.
9. *Рахматов А.Г.* Пружинные стали и сплавы: 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallurgy, 1982. – 400 с.
10. *Фургер И.В.* Термическая обработка сплавов: Справочник. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1982. – 304 с.

*Статья поступила в редакцию 9 июня 2016 г.*

## **REASERCH OF DEPENDENTS BETWEEN HARDNESS OF RIBBON FROM STEEL 60C2A AND HEAT TREATMENT CONDITIONS**

***E.M. Fomicheva***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The paper focuses on the investigation of the effect of heat treatment on reception quality of the mechanical properties and microstructure of the details steel grade 60S2A ribbon with thickness of 0.3 mm conforming to the production instructions heat treatment. For this purpose on the first phase the results of Vickers hardness are analyzed. The microstructure of the alloy parts is studied by metallographic analysis. The dependence between the microstructure and hardness values is investigated. Modes of heat treatment of the parts and defects caused by the technological process disturbance are described. The recommendations to prevent inconsistencies of hardness values of the technological process are given.*

***Keywords:*** structural steel 60S2A, hardening, tempering, microstructure, martensite, troostite, Vickers hardness.

---

*Ekaterina M. Fomicheva, Head of Department.*